

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ОБРАЗЦОВ P-InSb  
С КОНЦЕНТРАЦИЕЙ НЕСКОМПЕНСИРОВАННЫХ АКЦЕПТОРОВ  
 $6 \cdot 10^{11} - 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$

*Ф.Ф.Харажорин, М.Ф.Полубояринова, В.Г.Виноградова*

В исследованиях свойств антимонида индия р-типа большой интерес в настоящее время проявляется к выяснению вопроса о природе и положении энергетических уровней примесей, и, в частности, так называемого глубокого уровня. Обнаружению глубокого уровня в антимониде индия р-типа посвящено уже несколько работ [1-5]. Однако единой точки зрения относительно природы и характера этого уровня пока не существует. Можно надеяться, что расширение области исследования (по температуре, концентрации носителей, числу легирующих акцепторных элементов) позволит найти новые подходы к решению этой задачи.

В настоящей работе на компенсированных (степень компенсации выше 90%) образцах антимонида индия р-типа с удельным сопротивлением от 10 до 2740  $\text{ом} \cdot \text{см}$  и низкой концентрацией некомпенсированных дырок ( $6 \cdot 10^{11} - 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) в интервале от 4,2 до 300°K измерялись температурные зависимости коэффициентов Холла, электропроводности и подвижности. Монокристаллы легировались акцепторными примесями (марганцем, кремнием, германием, золотом) в процессе вытягивания по методу Чохральского.

В области 55-130°K более чем на 40 образцах исследованы температурные зависимости концентраций дырок, определенной как  $P = I/R \cdot e$ . Оказалось, что независимо от способа получения образца и природы легирующей примеси, глубокий уровень проявляется (имеются в виду соответствующие наклоны кривых [1-5] рис. 1 в интервале температур 78-110°K) только на образцах с концентрацией носителей  $p \sim 6 \cdot 10^{11} - 7 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$

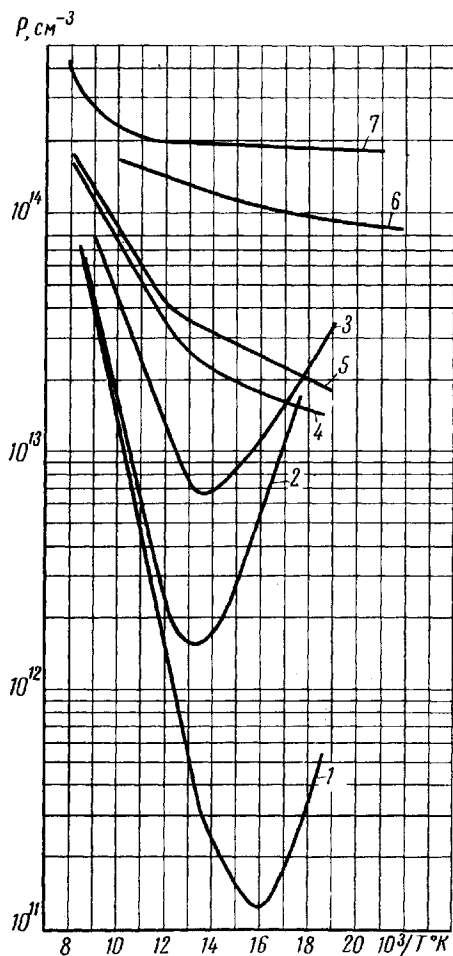


Рис.1. Зависимость концентрации дырок для образцов, легированных различными примесями, от температуры. Обозначения и параметры образцов при  $T = 78^\circ \text{K}$  даны в таблице

Т а б л и ц а

| №№<br>обр. | $p,$<br>$\text{см}^{-3}$ | $\rho,$<br>$\text{ом} \cdot \text{см}$ | $\mu,$<br>$\text{см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$ | Примесь |
|------------|--------------------------|--|---|---------|
| 1          | $6,0 \cdot 10^{11}$      | $2,74 \cdot 10^3$                      | $3,84 \cdot 10^3$                                 | Ge      |
| 2          | $1,6 \cdot 10^{12}$      | $9,5 \cdot 10^2$                       | $4,15 \cdot 10^3$                                 | Ge      |
| 3          | $7,65 \cdot 10^{12}$     | $4,52 \cdot 10^2$                      | $1,82 \cdot 10^3$                                 | Au      |
| 4          | $2,6 \cdot 10^{13}$      | $4,8 \cdot 10^1$                       | $5,05 \cdot 10^3$                                 | Mn      |
| 5          | $3,7 \cdot 10^{13}$      | $4,85 \cdot 10^1$                      | $3,5 \cdot 10^3$                                  | Au      |
| 6          | $1,3 \cdot 10^{14}$      | $1,35 \cdot 10^1$                      | $3,6 \cdot 10^3$                                  | Ge + Te |
| 7          | $2,0 \cdot 10^{14}$      | 4,5                                    | $6,95 \cdot 10^3$                                 | Ge      |

При более высоких концентрациях нескомпенсированных дырок он не обнаруживается (кривые 6,7, рис.1). Энергия активации глубокого уровня колеблется в зависимости от концентрации носителей в пределах 0,01 – 0,1 эв. Независимость энергии активации глубокого уровня от сорта легирующей примеси (рис. 2) заставляет предполагать, что этот уровень обусловлен дефектами решетки.

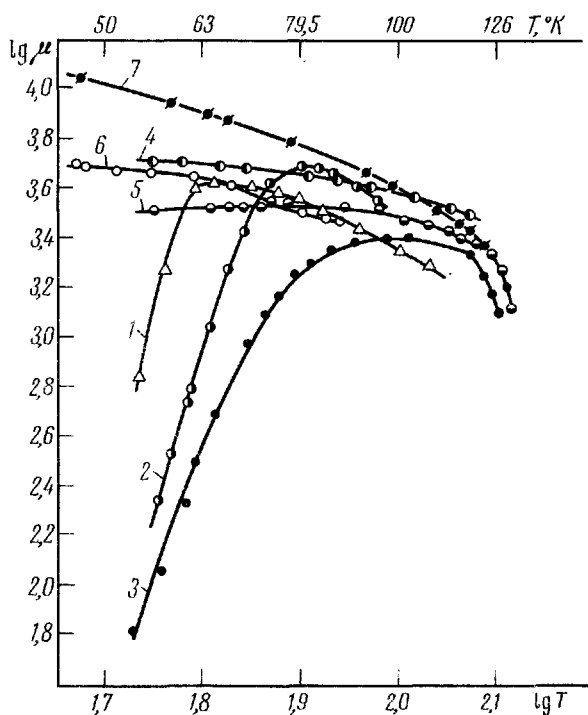


Рис.2. Зависимость энергии активации глубокого уровня от концентрации дырок. Обозначения:  $\times$  – InSb + Mn;  $\circ$  – InSb + Au;  $\bullet$  – InSb + Ge;  $\blacksquare$  – зонный;  $\triangle$  – термообработанный;  $\odot$  – нестехиометрический расплав

В отличие от работ [1-5] нами измерены образцы с очень низкой концентрацией нескомпенсированных дырок ( $6 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ), и это позволило обнаружить своеобразный температурный ход коэффициентов Холла и подвижности, заключающийся в том, что, независимо от сорта легирующей примеси: 1) образцы с концентрацией дырок  $p$ -порядка  $6 \cdot 10^{11} - 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  имеют четко выраженный минимум в ходе  $\rho = \rho(T)$ , не наблюдающийся у образцов с концентрациями нескомпенсированных дырок порядка  $10^{14} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ; 2) кривые  $\mu = \mu(T)$  для этих образцов имеют максимум, тогда как при концентрациях дырок  $\sim 10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$  наблюдается плавное уменьшение подвижности в этой же области температур (рис. 3).

Такое своеобразное поведение образцов с  $p \sim 6 \cdot 10^{11} - 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  не связано со свойствами их поверхности, так как повторные травления, промывки, а также измерения на образцах различной толщины не изменяли вида кривых.

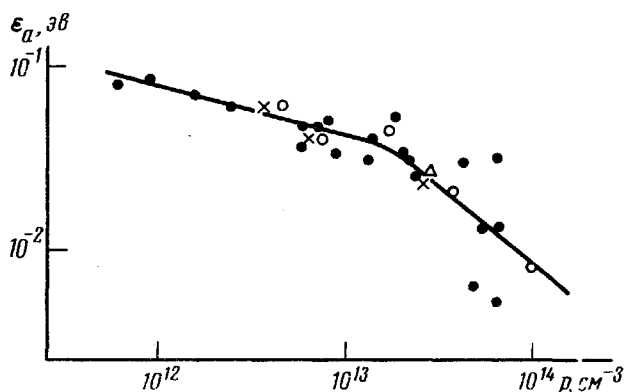


Рис.3. Зависимость подвижности дырок для образцов, легированных различными примесями, от температуры. Обозначения те же, что к рис.1

Ход кривых  $p = f(T)$  позволяет предположить существование примесной энергетической зоны, расположенной в запрещенной зоне. Однако концентрации дырок, рассчитанные по модели двух зон [7] (валентной и примесной), не дали удовлетворительного совпадения с экспериментальными кривыми. Измерения коэффициента Холла на тех же образцах антимолибдита индия р-типа с концентрацией дырок  $p \sim 10^{14} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$  в области температур 4,2-50°К позволили обнаружить примесную зону, обусловленную мелкими акцепторами. Энергия ионизации их колеблется в пределах  $(5-8) \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$ . Раздельно определенные концентрации акцепторов и доноров, например, на образце с концентрацией дырок  $p \sim 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  составляли соответственно  $N_a = 2,653 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_d = 2,650 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  ( $N_d/N_a$  99,95%). Следует отметить, что максимум на кривых  $R = f(10^2/T)$  с уменьшением концентрации носителей сдвигается в сторону более высоких температур. Так, на образцах р-InSb с концентрацией дырок (при  $T = 77^\circ\text{К}$ )  $2,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ;  $9,85 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $1,47 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  максимум в  $R = f(10^2/T)$  наблюдался соответственно при 18; 11,8 и  $6,2^\circ\text{К}$ . На образцах с концентрацией нескомпенсированных дырок  $\sim 6 \cdot 10^{11} - 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  примесная зона в области температур ниже  $50^\circ\text{К}$  не обнаруживалась.

Обнаруженные в этой работе новые экспериментальные факты пока не могут быть убедительно объяснены. В качестве предварительных соображений можно высказать следующие предположения. 1. Возможно, что максимумы на кривых  $R = f(T)$  для образцов с концентрациями  $6 \cdot 10^{11} - 6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  являются результатом одновременного действия

зоны мелких акцепторов и глубокого дефектного уровня. 2. Можно также предположить, что появление максимума связано с наличием в антимониде индия двух сортов дырок, соотношение концентраций которых меняется под действием ряда факторов. [6]

Поступило в редакцию  
5 мая 1967 г.

### Литература

- [1] R.A.Laff, H.Y.Fan. *Phys.Rev.*, 121, 53, 1961.
- [2] R.Cunningham, E.Harp, W.Bullis. *International Conference on Semiconductor Physics, Exeter, 1962.*
- [3] W.Bullis, V.Harrap. *International Conference on Semiconductor Physics, Paris, 1964.*
- [4] А.Д.Беркалиев, В.В.Галаванов, Д.Н.Наследов. *ФТТ*, 7, № 12; 1965 г.
- [5] Д.Н.Наследов, Ю.Г.Попов. *ФТТ*, 8, 1110, 1966.
- [6] Н.В.Коломоец, М.Н.Виноградова, Е.Я.Лев, Л.М.Сысоева. *ФТТ*, 8, 10, 1966.
- [7] Лянь Чжи-Чао, Д.Н.Наследов. *ФТТ*, 3, № 5, 1965.